坚持土肥高效管理 促进区域农田生态系统可持续发展

陈 欣　张旭东　宇万太　梁文举　何红波　郭书海　沈善敏

中国科学院沈阳应用生态研究所 沈阳生态实验站 沈阳 110016

摘要　辽河平原是我国温带农田生态系统的重要组成部分，辽河平原农业的高产高效对于巩固东北粮仓的“稳粮增效”具有重要作用。但是，由于耕地数量不断减少以及长期高强度利用造成资源和环境约束不断加剧，辽河平原农田生态系统的可持续发展受到严重制约。中国科学院沈阳生态实验站围绕区域农业生产和资源管理的核心问题，立足农田生态系统的长期监测和研究，揭示了不同养分管理模式下农田土壤综合肥力的演变规律。利用同位素示踪技术，明确了肥料氮素在农田生态系统的保持和转化以及调控机制。通过农田土壤“以碳控氮，碳氮平衡”管理模式的构建，建立了雨养旱地农业保护性耕作综合配套栽培技术体系。通过研发环境友好型稳定性肥料，实现了肥料减施增效，降低了面源污染风险。通过研究-示范-推广有效结合，土肥高效管理为区域现代农业发展和生态环境建设提供了科技支撑。

关键词　辽河平原，土壤养分管理，肥力演变与调控，稳定性肥料研发，旱地农业保护性耕作技术

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.2018.09.013

辽河平原是我国重要的商品粮生产基地，是我国温带农田生态系统的重要组成部分。辽河平原具有较强的农业生产能力，在国家粮食安全和国民经济发展中具有重要地位。但是，由于经济快速发展和城市化规模不断扩大，耕地资源数量不断减少。并且，在现有耕地资源中，长期集约化的高强度利用，造成了土壤退化严重，土壤板结、盐碱化加剧，土壤有机质含量下降，营养元素不平衡等多种问题，农田土壤的“变旱、变瘦、变薄”已严重影响辽河平原农业的综合生产能力。因此，围绕农业生产与农村经济发展的核心问题，在沈善敏研究员等老一辈农业生态学家和土壤学家的不断努力下，中国科学院沈阳应用生态研究所于1987年在辽宁省沈阳市苏家屯区建立了中国科学院沈阳生态实验站（以下简称“沈阳站”）。沈阳站秉承英国洛桑研究站的土壤肥力演变长期定位研究理念[1]，开展了长期的多组、多类型的农田生态系统定位实验研究，以探明辽河平原与农业

资助项目：国家重点研发计划项目（2016YFD0200307、2017YFD0200107）
修改稿收到日期：2018年8月29日

生产相关的养分循环、收支、转化和迁移的关键过程和农田土壤肥力演变规律[2]。同时不断结合新型肥料研发、生产与应用，坚持土肥高效管理，通过理论创新、技术模式的创建和示范推广，促进区域农田生态系统可持续发展。

1 揭示了不同养分管理模式下农田潮棕壤综合肥力的演变规律，为辽河平原旱地雨养农业生产施肥制度的优化和管理模式的改善提供了理论依据

建站伊始，沈阳站即布设了一系列养分管理定位实验（图1），通过明确不同养分循环和管理模式对关键肥力指标（包括土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾和土壤pH值等）的影响，探讨了土壤综合肥力的长期演变规律及其驱动机制。经过20余年的不同养分管理后（图2），农田土壤综合肥力指标在化肥施用后均有所降低，其中降低最为明显的是无养分输入处理和单施氮肥处理。氮磷钾均衡施用和有机肥有利于缓解土壤综合肥力指标的降低，但仅在化肥氮磷或氮磷钾均衡施用并配以循环有机肥的条件下才能使综合肥力得以维持或略为升高。因此，传统的养分循环再利用（厩肥、循环有机肥）对旱作农田土壤培肥作用显著，但20余年的研究结果也表明，单施循环有机肥无法达到高产稳产的目的。随着化学氮肥的施用以及磷、钾肥配合施用，作物产量明显提高，证明化肥的速效性对维持作物产量具有重要作用，但不均衡的化学养分输入模式也无法达到高产、稳产目标，形成"短板"效应，限制农作物产量进一步提高。养分循环再利用对无机养分具有重要的补充作用，可在一定程度上弥补土壤养分亏缺，因而有机肥与无机肥配施更利于作物产量的稳定。可见，即使在现代农业管理模式下，化肥和有机肥也具有不可替代性。在施用化肥基础上配以循环有机肥，以有机肥形式补充农田氮磷钾及微量养分，在提高农业废弃物利用效率的同时，对于维持土壤养分收支平衡、稳定作物产量、提高肥料利用效率具有明显作用。辽河平原潮棕壤不缺磷且相对富钾，氮是限制作物产量的主要因子。因此磷、钾用量应以满足作物需求为标准，再配合循环有机肥，实现氮磷钾收支略有盈余的施肥模式，构建适宜的土壤养分库，从而维持长期的养分元素供需平衡[3]。

2 建立了肥料氮素微生物同化过程的评价方法，明确了肥料氮素保持和转化的驱动机制，为构建农田土壤氮素高效利用的管理模式奠定了理论基础

长期以来，氮素高效利用都是农田潮棕壤土壤肥力管理的核心问题。由于外源无机氮素向土壤有机态氮的转化是由微生物驱动的生物化学过程，只有加强肥料氮的微生物同化，才能减少无机氮在土壤中的积累，降低



图1 养分循环与管理长期定位实验

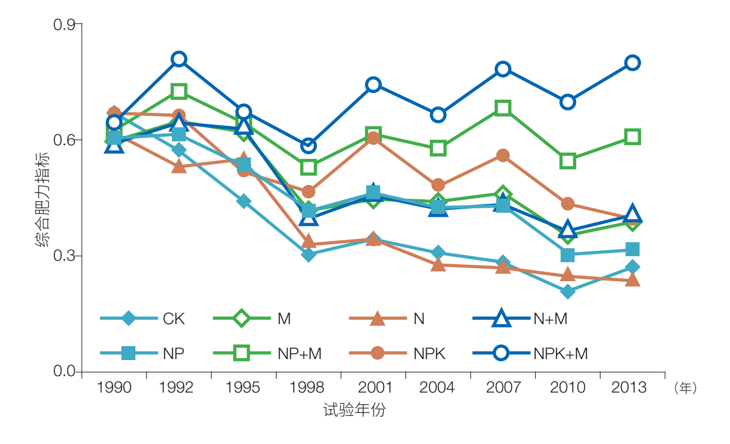


图2 不同养分管理对农田潮棕壤综合肥力的影响

CK为无肥处理，N、NP和NPK为分别施用化肥氮、氮磷和氮磷钾及其配施处理，M（循环有机肥）、N+M、NP+M和NPK+M为单施循环有机肥或循环有机肥与化肥配施处理

肥料氮素的损失风险。为突破评价外源氮素微生物的持续转化特性的方法学瓶颈，依托于沈阳站的 ^{15}N 同位素示踪长期定位试验，利用稳定微生物标识物（氨基糖）的“记忆效应”，建立了肥料氮素微生物同化过程的评价方法，从而定量指示肥料氮素的长期微生物转化过程和积累能力[4]。当平衡有效的能源、碳源和营养物质加入到土壤中后，微生物数量及其代谢活性迅速增加，同时伴随大量的微生物代谢物（如氨基酸）和残留物（如氨基糖）在土壤中积累，并可通过解聚矿化过程为作物和微生物持续提供可利用氮素，具有可高度循环性的氮素是土壤“有效氮过渡库”的重要组成部分[5]。土壤微生物通过体内周转途径中的“碳泵”增强“续埋效应”，从而实现对土壤养分同化的贡献[6]。“过渡态”氮素的解聚、矿化过程受土壤氮素水平的反馈调节。作物利用导致的土壤有效氮素含量下降是启动过渡态有机氮解聚过程的必要条件，因而其矿化过程与作物需要相吻合，可满足当季作物生长及后茬作物的氮素需求。因此，通过微生物能源和碳源调控手段，提高土壤中有机质的积累以及改善有机质活性，可提高无机氮素向“过渡态”氮素的转化速率，增加“过渡态”有效氮素的容量，通过“以碳控氮，碳氮平衡”的过程控制，最终降低土壤氮素的损失（图 3）。经过 10 年的覆盖秸秆 -^{15}N 肥料示踪实验，证实了土壤“有效氮过渡库”对肥料氮素转化和作物利用的调控作用。覆盖秸秆通过促进微生物同化作用显著增加了肥料氮素在土壤中的残留，肥料氮素在耕层残留的显著增加促进了肥料氮素的再利用，降低了肥料氮素的淋失风险。

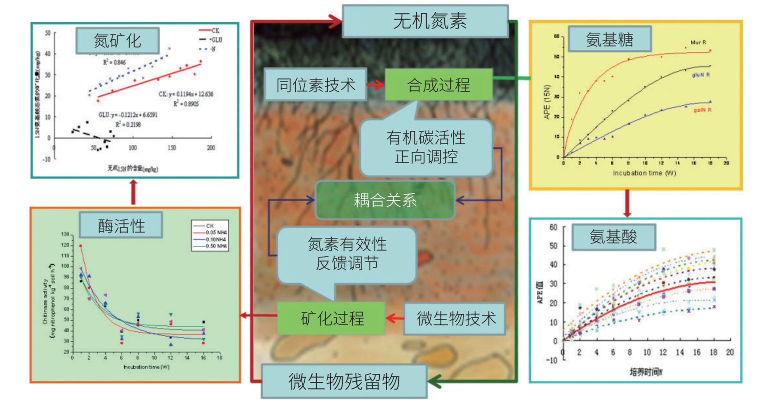


图 3　土壤有机有效氮素过渡库的核心理论

3 建立了雨养旱地农业保护性耕作综合配套栽培技术体系，为区域现代农业发展和生态环境建设提供了科技支撑

针对东北平原资源、环境约束不断加剧的问题，以沈阳站的农田废弃物高效利用技术为核心，中国科学院沈阳应用生态研究所和梨树县农业技术推广总站于 2007 年在梨树县高家村建立了东北地区第一块玉米秸秆覆盖栽培技术试验示范基地，面积为 15 公顷，在东北地区开展玉米秸秆全覆盖保护性耕作技术研究成果在农业生产中的推广应用（图 4）。经过 10 年的探索，通过立杆分解、秸秆归行和适时深松等技术模式的完善，建立了适合当地气候和土壤条件的免耕秸秆覆盖技术，在东北旱作农区已形成“梨树模式”和免耕机械发展相互促进的现代农业模式。秸秆覆盖免耕技术体系不仅可以遏制土壤退化，同时可以抗旱保墒、增加土壤蓄水保水能力、减少土壤风蚀水蚀，具有显著的综合生态环境效益，也是东北地区现代化和规模化农业的重要发展方向。为加快科研成果的转化与推广应用，沈阳站和梨树县农业技术推广总站、东北黑土地保护与利用科技创新联盟等单位和组织密切配合，建立并完善了“五位一体”的研究推广机制，即科研单位、大专院校、技术推广部门、农机制造企业、农机作业组织（如农机合作社、农机作业队等）五类机构整合，在吉林、辽宁、黑龙江三省和内蒙古自治区进行了秸秆覆盖免耕技术的推广应用，促进了新型农业经营主体和现代农业机械研发在东北地区的全面发展，为东北地区耕作制度改革奠定了良好的基础（图 5）。至 2017 年，推广面积已达 150 万亩，每年可为农民增加经济效益 2 亿元。尤其在 2018 年春旱严重的东北地区，和常规坐水播种相比，玉米秸秆覆盖免耕成为干旱和风沙地区春播生产的一个突出亮点，成为绿色农业生产方式的排头兵。

沈阳站所开展的示范推广工作，不仅取得了良好的经济效益，也产生了极大的社会影响。中央电视台英文频

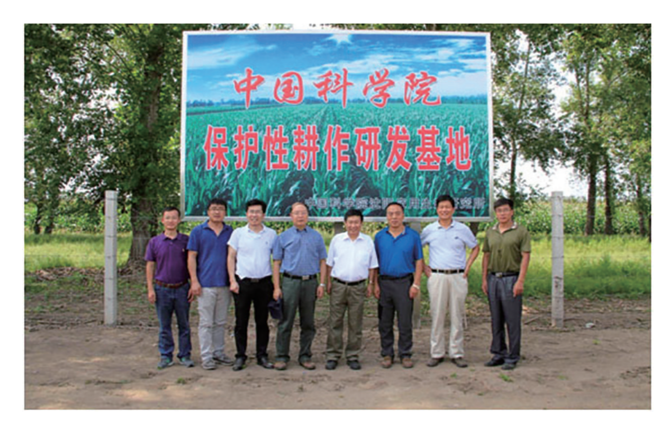


图4 中国科学院保护性耕作研发基地（吉林省梨树县）





图5 秸秆覆盖播种出苗情况和机械播种

道于2015年巴黎气候变化大会前夕播出了沈阳站在吉林省梨树县保护性耕作研发基地进行的“机械化秸秆覆盖免耕技术”的研究成果①。该报道认为，该项研究成果为秸秆利用提供了新思路和新方法，不仅解决农业生产的高产高效问题，同时为我国进行农业清洁生产和雾霾防控提供了思路。2015年12月19日，中央电视台《焦点访谈》栏目再次报道了沈阳站“机械化秸秆覆盖免耕技术”研究成果的应用情况②，报道认为该研究成果“接地气”，解决了农业生产中的实际问题，加速了农业发展的进程，应加大研究力度及示范推广面积。2016年农业部官方网站也撰文指出“梨树率先解决黑土地土壤退化世界性难题”。按照中国科学院对特色研究所的要求，以服务地方为指导思想，沈阳站将继续推进免耕秸秆覆盖技术，为东北地区耕作制度改革及黑土可持续利用提供理论和技术支持。

4 研发推广环境友好型稳定性肥料，为实现肥料减施增效、降低面源污染风险作出了重要贡献

土肥一体化管理不仅通过土壤培肥措施提高土壤保肥供肥能力，同时通过生物化学抑制剂的使用，使肥料养分释放特征更加适应作物对养分的需求规律。早在1998年，中国科学院沈阳应用生态研究所张志明团队的创新性工作“新型肥料——长效碳酸氢铵的研制与应用”获得了国家科技进步奖二等奖，2008年“长效缓释肥料研制与应用”再次获得国家科学技术进步奖二等奖，彰显了沈阳站在以抑制剂为核心的新型肥料的研发工作中一直处于国内领先水平；并且近年来已有多项专利转让，经费500余万元（图6）。由沈阳站与施可丰化工股份有限公司、国家化肥质量监督检验中心（上海）等牵头制定的《中华人民共和国化工行业标准：稳定性肥料》（GB/T35113-2017）通过国家质量监督检验检疫总局、国家标准化管理委员会批准，并于2018年7月1日正式实施。

随着生物化学抑制剂引入农业，肥料氮在土壤-作物系统中的留存形态与时间均随之改变，从而显著影响肥料氮在土壤中的保存及后续供应过程，养分损失减少，利用率提高[7,8]。硝化抑制剂和脲酶抑制剂有利于提高铵态氮肥的固定和肥料氮素向有机氮库的转化[9]，对氨挥发、硝化反硝化引起的N_2O排放、NO_3^-的淋溶以及综合温室气体排放指数产生了显著的影响[10]，显著降低农田面源污染风

① http://english.cntv.cn/2015/12/04/VIDE1449204843910183.shtml.
② http://tv.cntv.cn/video/C10326/e9ce1cef9b284a2b9b0667a16010f6.

险[11-13]。作为稳定性肥料产学研联盟的发起单位，中国科学院沈阳应用生态研究所及沈阳中科新型肥料有限公司以沈阳站为窗口，加强农化服务，将科研成果通过网络化示范，快速转化为广大农民的现实生产力。新型稳定性肥料、新型生物有机肥、作物专用肥料和生物碳基肥料等增效肥料在沈阳站的长期实验表明，在辽河平原地区开发和使用的改性肥料对肥料利用率的提高及增产增效贡献显著。和当地常规施肥水平（200—240 kg ha^{-1}）相比，在肥料减施 20%—25% 条件下可获得相当产量，平均每亩增加收益 100—200 元（图 7）。在全国 20 个省、直辖市和自治区推广面积 3.7 亿亩，平均增产 11.3%，减少肥料施用 10%—20%，创造效益 150.1 亿元。

5 深入解析农田土壤镉污染来源，为实现重金属污染源头防控和污染土地安全利用奠定了坚实基础

沈阳作为我国传统的工业基地，“三废”排放中重金属浓度较高，污灌区土壤污染严重。重金属在土壤中长期滞留，环境风险巨大。同时，由于城镇化的快速进行，资源、环境约束加剧，污染土地安全利用已成为辽宁省“净土工程”的核心问题。沈阳站的郭书海研究员建立了辽宁省土壤镉（Cd）污染基础数据库，并制定了数字化区域防控方案。同时在典型的城市工业与农业污染的叠加区（沈阳站新民屯站区），通过建设地块化、信息化、污染物物流过程精准控制的现代化科研样地，为城郊重金属污染农用地安全利用与农产品安全保证提供了试验数据与科技支撑。利用土壤重金属通量估算模型，通过均值分析比较输入、输出途径中各要素的贡献，可以看出农田土壤镉污染的主要来源为灌溉水，这是造成农田污染的首要原因（图 8）。随着采取相应措施对灌溉水进行治理，其对灌区污染的贡献幅度将开始降低。其次是大气干湿沉降，二者所占比例为 42.6%。由于灌区附近化工冶炼、燃煤取暖等活动频繁，雾霾现象频发，大气干湿沉降将会成为农田镉污染来源的主要途径。农田系统中镉元素的输出，作物收割占有绝对主要地位，通过水稻植株地上部分带出农田系统的镉量占整个输出途径的 89.8%。



图 6 沈阳站专利技术转让和企业合作





图 7 常规施肥和长效肥、专用肥的施用效果对比

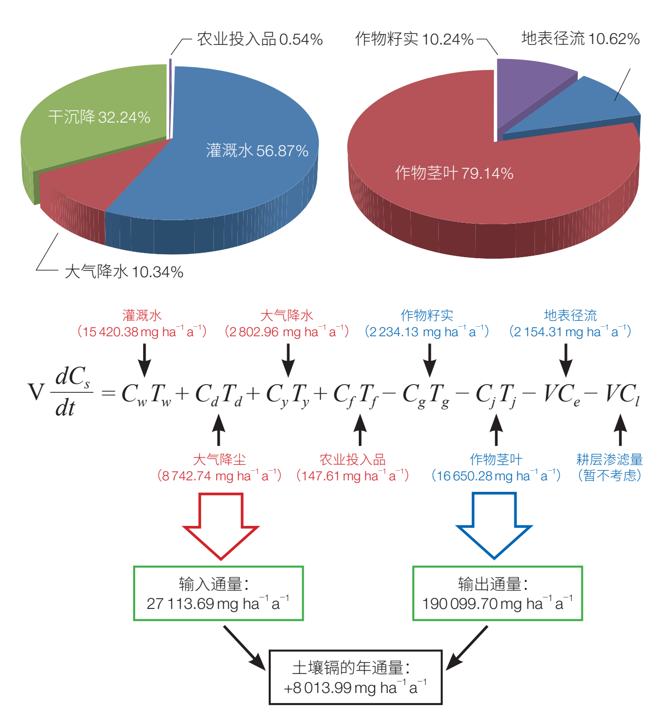


图 8　农田生态系统中镉的输入、输出途径及贡献率

针对我国因环境污染引起的农产品中重金属超标、进而造成农产品质量安全风险等问题，郭书海提出了协同管控农产品重金属含量超标风险的建议，从统筹考虑土壤和农作物两个因素、建立农作物吸收/积累重金属的指标体系、协同管控农产品超标风险等角度，提出了建议和措施。在农田生态管理上，应开展针对不同土壤理化性质、不同土壤环境质量的农作物种植适宜性评估与等级划分，优选可规避风险的种植品种，制定分类、分区的种植规划，开展典型区的协同管控技术示范，完善农产品的质量安全保障体系，切实推进辽宁省“净土工程”的有效实施。

6 结语

沈阳站自 1987 年建站以来，围绕东北平原农业生产和生态环境中的核心问题，开展了长期而卓有成效的科学研究、技术研发和示范推广，为保障国家粮食安全，提高区域生态环境质量作出了重要贡献。针对东北地区土壤退化和生态环境恶化的关键问题，利用长期定位实验，揭示了不同养分管理模式下农田潮棕壤综合肥力的演变规律；通过在理论上构建农田土壤“以碳控氮，碳氮平衡”的管理模式，建立了雨养旱地农业保护性耕作综合配套栽培技术体系，促进了农村耕作制度和供给侧结构改革，为区域现代农业发展和生态环境建设提供了科技支撑。沈阳站多年来坚持土肥一体管理，研发和推广稳定性肥料，遏制土壤退化，为实现肥料减施增效、降低面源污染风险作出了重要贡献。未来，沈阳站要全面贯彻绿色发展理念，兼顾农村经济发展和生态环境保护，在中国科学院“率先行动”计划指导下，为区域农业可持续发展做出更大的贡献。

参考文献

1 沈善敏. 国外的长期肥料试验（一）. 土壤通报, 1984, 15(2): 85-91.

2 沈善敏. 长期土壤肥力试验的科学价值. 植物营养与肥料学报, 1995, (1): 1-9.

3 宇万太, 姜子绍, 周桦, 等. 不同施肥制度对作物产量及肥料贡献率的影响. 中国生态农业学报, 2007, 15 (6): 54-58.

4 He H B, Zhang W, Zhang X D, et al. Temporal responses of soil microorganisms to substrate addition as indicated by amino sugar differentiation. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43: 1155-1161.

5 Lü H J, He H B, Zhao J S, et al. Dynamics of fertilizer-derived organic nitrogen fractions in an arable soil during a growing season. Plant and Soil, 2013, 373(1): 595-607.

6 Liang C, Schimel J P, Jastrow J D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. Nature Microbiology, 2017, 2(8): 17105.

7 Chen G, Huang B, Xu H, et al. Nitrous oxide emissions from terrestrial ecosystems in China. Chemosphere-Global Change Science, 2000, 2: 373-378.

8 Chen X, Cabrera M L, Zhang L, et al. Nitrous oxide emission from upland crops and crop-soil systems in northeastern China. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 62(3): 241-247.

9 Ma Q, Wu Z J, Shen S M, et al. Responses of biotic and abiotic effects on conservation and supply of fertilizer N to inhibitors and glucose inputs. Soil Biology & Biochemistry, 2015, 89: 72-81.

10 陈欣, 沈善敏, 张璐, 等. N、P供给对作物排放N_2O的影响研究初报. 应用生态学报, 1995, 6(1): 104-105.

11 黄国宏, 陈冠雄, 张志明, 等. 玉米田N_2O排放及减排措施研究. 环境科学学报, 1998, 18: 344-349.

12 Dong X X, Zhang L L, Wu Z J, et al. The response of nitrifier, N-fixer and denitrifier gene copy numbers to the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate. Plant Soil and Environment, 2013, 59(9): 398-403.

13 Zhang L, Wu Z, Jiang Y, et al. Fate of applied urea ^{15}N in a soil-maize system as affected by urease inhibitor and nitrification inhibitor. Plant Soil and Environment, 2010, 56 (1): 8-15.

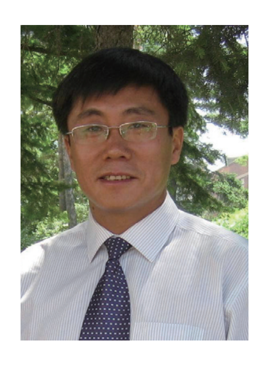
Efficient Management on Soil and Fertilizer to Promote Sustainable Development of Local Agro-ecosystems in Liaohe Plain, China

CHEN Xin ZHANG Xudong YU Wantai LIANG Wenju HE Hongbo GUO Shuhai SHEN Shanmin

(Shenyang Agro-ecosystem Experimental Station, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract Liaohe Plain is an important region of the temperate agro-ecosystem in China. To develop efficient agriculture in Liaohe Plain is the key to the stability of food production in Northeast China. However, the sustainable development of agro-ecosystem in Liaohe Plain has been severely constrained by decreasing cultivated land and worsening environment caused by long-term excessive use of resources. Focusing on the development of local agriculture and the management on agricultural resources, Shenyang Agro-ecosystem Experimental Station has conducted a series of long-term experiments since 1990s to explore the change of soil fertility under different management modes of soil nutrients. The retention, transformation and control mechanisms of fertilizer nitrogen in local agro-ecosystem have been clarified by isotope tracing techniques. A series of conservation tillage techniques have been established in rainfed arable soils based on the management mode of "nitrogen control with carbon to achieve a balance". Fertilizer efficiency has grown and the risk of non-point source pollution in agro-ecosystems decreased with the development of environmental-friendly and stabilized fertilizers. Through the combination between research, trial and extension, efficient management on soil and fertilizer provides scientific and technological support for regional modern agricultural development and ecological environment construction.

Keywords Liaohe Plain, soil nutrient management, change and control of soil fertility, development of stabilized fertilizer, conservation tillage technique in arable soil



陈 欣 中国科学院沈阳应用生态研究所研究员，辽宁沈阳农田生态系统国家野外科学观测研究站站长。专业方向是农业生态和环境科学，主要从事土壤-作物系统中主要营养元素生态过程、农业面源污染调控和设施农业土壤生态等方面的研究。1996—1997年、1999—2000年及2013—2014年，分别赴比利时根特大学、美国佐治亚大学和日本资源环境国立研究所进行合作研究。兼任辽宁省环境学会副理事长、辽宁省地理学会副理事长、辽宁省土壤学会理事、中国科学院大学教授、《生态学杂志》和《农业资源与环境学报》编委等职；辽宁省"百千万人才工程"百人层次入选者。曾先后主持国家自然科学基金面上项目、国家重大科技专项水专项和

国家科技支撑计划等课题10余项。现主持国家自然科学基金面上项目2项、水专项课题1项。发表相关学术论文160余篇，其中第一和通讯作者发表SCI/EI论文50余篇，第一发明人授权专利5项，主编专著1部，参编专著3部；2008年获得辽宁省自然科学奖，2011年获中国科学院优秀研究生导师奖。E-mail: chenxin@iae.ac.cn

CHEN Xin Born in 1968, Ph.D., Professor in the Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences (CAS), and the director of Shenyang Agro-ecosystem Experimental Station. His major field is agricultural ecology and environmental science, mainly engaged in the research of the ecological process of major nutrient elements in agro-ecosystems and soil-crop system, agricultural non-point source pollution control, soil ecological environment in facilities agriculture, and other aspects. As a visiting research fellow he worked at Ghent University from 1996 to 1997, University of Georgia from 1999 to 2000, and National Institute of Resources and Environment in Japan from 2013 to 2014. Currently he is a member of the academic committee of Institute of Applied Ecology, CAS. He also works as the deputy director for Youth Work Committee in Soil Science Society of China, executive director of Liaoning Environmental Science Society, director of Liaoning Soil Science Society and the editorial committee of *Journal of Ecology*. He has been selected as one of Hundred Talent in the Hundred, Thousand and Ten Thousand Talent Project in Liaoning Province. He has presided over more than 10 projects, sponsored by National Natural Science Foundations of China, National Water projects, and National Science and Technology Support programs. Now he takes charge of one project sponsored by National Natural Science Foundation of China, and one major national water project. Up to now, he has published more than 160 papers in peer reviewed journals, among which more than 50 have been published as the first and corresponding authors. He has five authorized patents as the first inventor and he published one monograph as a co-author. He gained Natural Science Award for Science and Technology of Liaoning Province in 2008 and Outstanding Postgraduate Advisors of Chinese Academy of Sciences in 2011. E-mail: chenxin@iae.ac.cn

■责任编辑：刘天星